

Efek bias troposfer pada pemantauan deformasi G. Guntur dengan metode survei GPS

Hasanuddin Z. Abidin¹⁾, O. Yolanda¹⁾, I. Meilano¹⁾, O. K. Suganda²⁾, M. A. Kusuma¹⁾, D. Muhandi¹⁾, B. Setyadji¹⁾, R. Sukhyar²⁾
J. Kahar¹⁾, T. Tanaka³⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha 10, Bandung, E-mail : hzabidin@indo.net.id

²⁾ Direktorat Vulkanologi, Deptamben, Jl. Diponegoro 57, Bandung

³⁾ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Kyoto, Japan

Masuk: Januari 1998; revisi masuk: Februari 1998; diterima: Maret 1998

Sari

Pemantauan deformasi gunung api yang andal menuntut ketelitian yang tinggi, yaitu sampai level ketelitian mm untuk kasus gunung api yang tengah 'bangkit' kembali. Konsekuensinya adalah kesalahan dan bias yang dapat mengurangi ketelitian dalam penentuan posisi dengan satelit GPS harus dieliminasi dan atau direduksi, seperti kesalahan yang disebabkan oleh bias troposfer.

Pada kasus pemantauan deformasi gunung api dengan metode survei GPS, karena adanya perbedaan tinggi yang cukup besar dan variatif antara titik-titik dalam jaringan, maka efek kesalahan bias troposfer tidak sepenuhnya dapat direduksi dengan proses pengurangan data (*differencing*). Residu (sisa) bias troposfer ini harus dikoreksi agar tingkat ketelitian yang dituntut oleh sistem pemantauan deformasi gunung api dapat tetap tercapai.

Pada makalah ini akan dibahas efek bias troposfer pada pemantauan deformasi gunung api. Pembahasan didasarkan pada hasil yang diperoleh dari pemantauan deformasi G. Guntur (Garut, Jawa Barat) dengan metode survei GPS.

Kata kunci : GPS, gunung api, deformasi, pemantauan, bias troposfer

Abstract

The effects of tropospheric bias on deformation monitoring of MT. Guntur using GPS survey method

A reliable volcano deformation monitoring requires a high positioning accuracy, i.e. up to mm level in the case of reawakening volcanoes. As a consequence of this requirement, the errors and biases affecting the GPS positioning accuracy has to be eliminated or reduced, which one of them is the tropospheric bias.

In the case of volcano deformation monitoring using the GPS survey method, due to a relatively large altitude variation in the stations' altitude, the effects of tropospheric bias could not be effectively reduced by the differencing process. In order to meet the accuracy requirement of volcano deformation monitoring system, this residual tropospheric bias, therefore, has to be somehow corrected or taken into account.

In this paper, the effects of tropospheric bias on the volcano deformation monitoring will be discussed. The discussion is based on the results from the deformation monitoring of Guntur volcano in Garut, West Java, by using repeated GPS surveys.

Key words : GPS, volcano, deformation, monitoring, tropospheric bias

1 Pendahuluan

Letusan gunung api umumnya bersifat sangat merusak, baik untuk lingkungan alam maupun manusia, dan kerugian material maupun non-material yang ditimbulkan umumnya sangat besar dan sulit untuk dikuantifikasi. Karena dampak letusan gunung api yang besar tersebut, para vulkanolog telah banyak berusaha mempelajari dan meneliti sebab dan mekanisme aktivitas gunung api dalam rangka meningkatkan pemahaman terhadap fenomena gunung api dan juga

dalam rangka membangun metode prediksi letusan gunung api yang dapat diandalkan.

Banyak sensor dan metode yang telah digunakan untuk memantau aktivitas gunung api, seperti metode visual, metode seismik, metode termal, metode kimia gas, metode penginderaan jauh, dan metode deformasi. Salah satu metode yang cukup efektif, di samping metode seismik yang umum digunakan, adalah metode pengukuran geodetik terhadap deformasi horizontal dan vertikal dari zone gunung api tersebut. Dalam hal ini pola dan kecepatan deformasi permukaan tersebut dapat

digunakan untuk mengungkapkan karakteristik aktivitas magmatik gunung api yang bersangkutan (lokasi dan pusat tekanan), dan selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk memprediksi letusan gunung api serta perkiraan volume muntahnya. Dalam konteks pemantauan deformasi gunung api, salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode survei GPS yang dilakukan secara periodik.

Pemantauan deformasi gunung api dengan metode survei GPS pada prinsipnya dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada metode ini beberapa monumen yang membentuk suatu kerangka (jaringan) yang tersebar pada tubuh gunung api yang bersangkutan serta daerah sekitarnya, ditentukan koordinatnya secara teliti dengan menggunakan metode survei GPS, relatif terhadap stasion referensi yang ditempatkan pada lokasi yang stabil di luar zone deformasi gunung api yang bersangkutan. Koordinat yang teliti dari titik-titik kerangka GPS tersebut ditentukan secara episodik (berkala) dengan interval waktu tertentu. Dengan mempelajari pola dan kecepatan perubahan vektor koordinat dari titik-titik tersebut dari waktu ke waktu, maka karakteristik deformasi dari gunung api dapat dipelajari, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Karakteristik deformasi dari gunung api, baik dalam arah horizontal maupun vertikal, selanjutnya dapat digunakan sebagai salah satu data masukan untuk mempelajari karakteristik aktivitas gunung api tersebut.

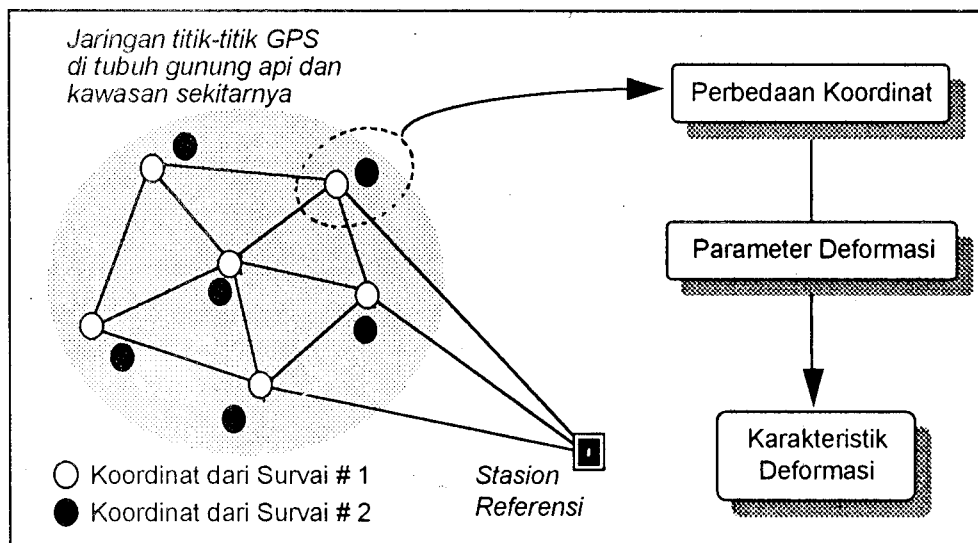
Pada pemantauan deformasi gunung api dengan metode survei GPS, untuk mendapatkan informasi deformasi yang andal, ketelitian posisi titik sampai level mm sangat diharapkan, terutama dalam pemantauan gunung api yang sedang 'bangun kembali dari tidurnya', yang tingkat deformasinya umumnya relatif kecil. Untuk mencapai tingkat ketelitian yang tinggi, maka kesalahan dan bias yang dapat mengurangi ketelitian dalam

penentuan posisi dengan satelit GPS harus dieliminasi atau direduksi.

Salah satu kesalahan dan bias yang mempengaruhi data pengamatan satelit GPS adalah yang berkaitan dengan medium propagasinya [Abidin, 1995], yaitu *bias ionosfer* dan *troposfer*. Bias-bias ini tidak mungkin dihindari karena dalam perjalanannya dari satelit ke pengamat di bumi, sinyal GPS harus melalui medium ionosfer dan troposfer.

Pada kasus pemantauan deformasi gunung api dengan metode survei GPS, karena jarak antar- *baseline* umumnya relatif pendek, maka bias ionosfer umumnya tidak terlalu menjadi masalah karena dapat dieliminasi secara efektif dengan mekanisme pengurangan data. Apalagi kalau receiver GPS tipe geodetik dua-frekuensi digunakan, maka efek bias ionosfer ini akan dapat diminimalkan lebih lanjut. Untuk bias troposfer, karena adanya perbedaan tinggi yang relatif besar dan variatif antara titik-titik dalam jaringan, maka efek kesalahan bias troposfer tidak sepenuhnya dapat direduksi dengan proses pengurangan data (*differencing*). Di samping sinyal GPS ke setiap titik melalui tebal lapisan troposfer yang berbeda-beda, kondisi meteorologis yang berbeda-beda di setiap titik juga akan menyebabkan adanya residu (sisa) bias troposfer yang cukup berarti pada data GPS dan dapat diharapkan besarnya akan bervariasi dari titik ke titik. Ilustrasi kedua fenomena di atas diberikan pada Gambar 2. Residu (sisa) bias troposfer yang variatif ini harus dikoreksi agar tingkat ketelitian yang dituntut oleh sistem pemantauan deformasi gunung api dapat tetap tercapai.

Pada makalah ini akan dibahas efek bias troposfer pada pemantauan deformasi gunung api seperti yang dijelaskan di atas. Pembahasan akan didasarkan pada hasil pengolahan data dari tiga kali survei GPS untuk



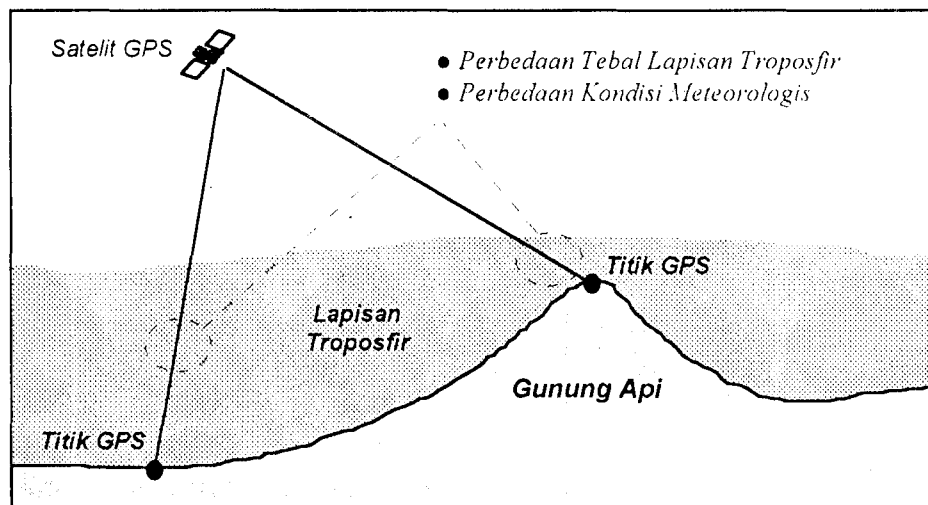
Gambar 1 Pemantauan deformasi gunung api secara episodik dengan menggunakan metode survei GPS.

pemantauan deformasi G. Guntur di daerah Garut, Jawa Barat. Dalam hal ini efek bias troposfer pada besarnya pergeseran titik, yang merupakan salah satu parameter penting dalam analisis deformasi, akan ditunjukkan dan dibahas, termasuk efeknya terhadap ketelitian nilai pergeseran. Di samping itu, beberapa kesimpulan dan saran juga akan diberikan.

Sebagai latar belakang pembahasan berikut ini akan dijelaskan secara singkat efek bias troposfer pada data pengamatan GPS serta karakteristik gunung api Guntur di kawasan Garut yang merupakan obyek penelitian ini.

2 Bias troposfer

Sinyal dari satelit GPS untuk sampai ke antena harus melalui lapisan troposfer, yaitu lapisan atmosfer netral yang berbatasan dengan permukaan bumi di mana temperatur menurun dengan membesarnya ketinggian. Lapisan troposfer ini mempunyai ketebalan sekitar 9 sampai 16 km, tergantung pada tempat dan waktu. Ketika melalui troposfer sinyal GPS akan mengalami refraksi, yang menyebabkan perubahan pada kecepatan dan arah sinyal GPS, seperti yang diilustrasikan pada



Gambar 2 Efek Bias Troposfer pada Survei GPS di Kawasan Gunung Api.

Gambar 3. Perubahan kecepatan dan arah sinyal ini selanjutnya akan mempengaruhi ketelitian hasil ukuran jarak ke satelit GPS.

Pada frekuensi sinyal GPS (di bawah 30 GHz), magnitude bias troposfer tidak tergantung pada frekuensi, dan oleh sebab itu besarnya tidak dapat diestimasi dengan pengamatan pada dua frekuensi. Patut dicatat di sini bahwa kedua jenis data ukuran jarak dengan GPS, yaitu *pseudorange* dan fase, kedua-duanya diperlambat oleh troposfer, dan besarnya magnitude bias troposfer pada kedua data pengamatan tersebut adalah sama. Dengan kata lain kedua jarak tersebut akan diperpanjang oleh lapisan troposfer, sehingga terdapat apa yang umum dinamakan bias troposfer. Besarnya bias troposfer ini berkisar sekitar ≈ 2.3 m di arah zenith sampai ≈ 20 m pada 10 di atas horizon, tergantung pada temperatur, tekanan, dan kelembaban udara di sepanjang lintasan sinyal dalam lapisan troposfer.

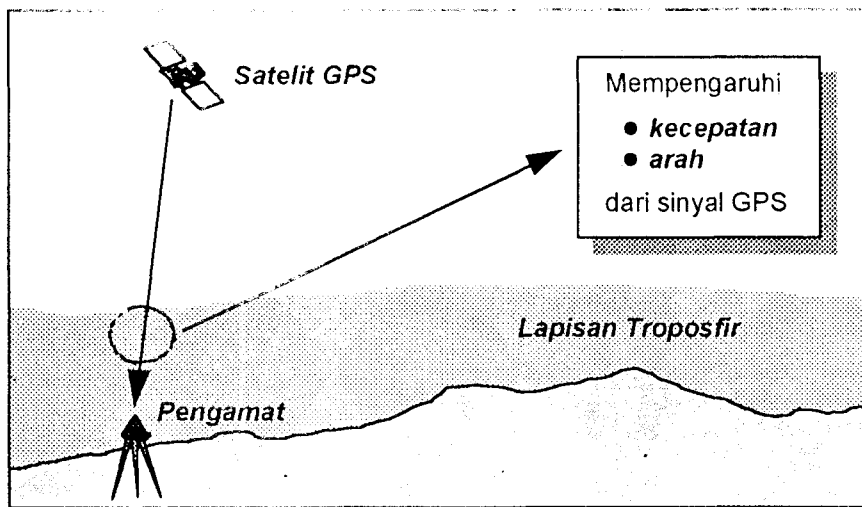
Bias troposfer biasanya dipisahkan menjadi komponen kering ($\approx 90\%$ dari bias total) dan komponen basah. Dengan menggunakan model troposfer (seperti model Hopfield, Sastamoinen, Marini) serta data ukuran meteorologi (temperatur, tekanan, dan kelembaban) di

permukaan bumi, magnitude komponen kering bias troposfer biasanya dapat diestimasi sampai ketelitian $\approx 1\%$.

Magnitude komponen basah, yang terutama tergantung pada kandungan uap air sepanjang lintasan sinyal, biasanya lebih sulit diestimasi secara teliti daripada data pengamatan meteorologi di permukaan bumi. Dengan menggunakan data meteorologi di permukaan bumi, magnitude komponen basah ini biasanya hanya bisa diprediksi sampai dengan ketelitian $\approx 3 - 4$ cm [Wells et al., 1986]. Untuk mendapatkan ketelitian yang lebih baik dapat digunakan peralatan WVR [Water Vapour Radiometer] yang dapat mengukur kandungan uap air sepanjang lintasan sinyal. Akan tetapi, instrumen ini cukup mahal harganya, ukurannya cukup besar, dan juga cukup berat.

Dalam konteks penentuan posisi atau survei dengan GPS, ada beberapa cara yang dapat diterapkan untuk mereduksi besarnya efek troposfer, yaitu:

- Lakukan *differencing* hasil pengamatan.
- Perpendek panjang *baseline*.



Gambar 3 Efek troposfir terhadap sinyal GPS.

- Usahakan kedua stasiun pengamat berada pada ketinggian serta kondisi meteorologis yang relatif sama.
- Gunakan model koreksi standar troposfer seperti model Hopfield dan Sastamoinen.
- Gunakan model koreksi lokal troposfer.
- Gunakan pengamatan Water Vapour Radiometer (WVR) untuk mengestimasi besarnya komponen basah.
- Estimasi besarnya parameter bias troposfer, biasanya dalam bentuk *zenith scale factor* untuk setiap titik dalam jaringan.
- Gunakan parameter koreksi yang dikirimkan oleh sistem *Wide Area Differential GPS* (WADGPS).

Dalam operasionalisasinya, beberapa teknik pereduksian bias troposfer di atas dapat diterapkan sekaligus secara simultan. Perlu dicatat di sini bahwa untuk model koreksi standar troposfer, besarnya bias troposfer dihitung dengan menggunakan data temperatur, tekanan, dan kelembaban udara yang diukur di permukaan bumi, yaitu di titik-titik pengamatan GPS. Dalam hal ini dikenal beberapa model standar troposfer, antara lain model Essen-Froome, Hopfield, Sastamoinen, Black, Marini. Penjelasan yang lebih lengkap mengenai model troposfer yang digunakan dalam studi ini dapat dilihat di [Seeber, 1993].

3 Gunung Guntur, Garut, Jawa Barat

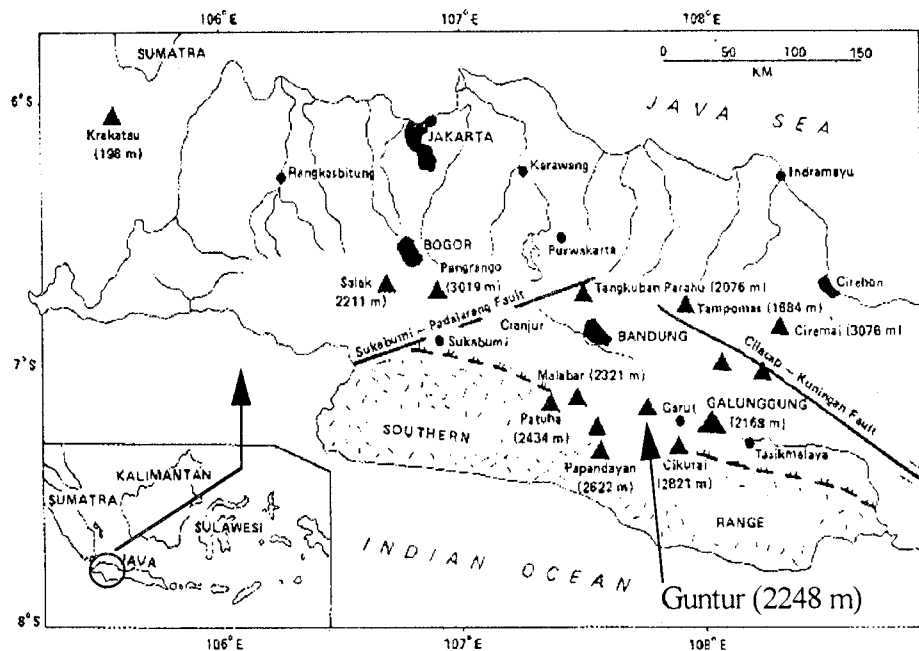
Obyek penelitian pemantauan deformasi gunung api dengan GPS ini adalah G. Guntur di daerah Garut. G. Guntur adalah gunung api strato andesitik yang terletak beberapa km dari kota Garut dan sekitar 40 km dari Bandung ke arah tenggara (lihat Gambar 4). G. Guntur

adalah nama sebuah puncak dari sekelompok gunung yang muncul di atas tiga daerah dataran tinggi, terletak sebelah barat dataran aliran Cimanuk. Gunung ini mempunyai ketinggian 2249 m di atas permukaan laut, 1550 m di atas dataran sungai Cimanuk. Secara geografis Gunung Guntur berlokasi pada lintang : 07° 09' 08" S dan bujur : 107° 50' 57" T. Seperti terlihat pada Gambar 4, di sekitar Gunung Guntur juga terdapat gunung api lainnya seperti Papandayan, Cikuray, dan Galunggung. Bentuk fisik Gunung Guntur sendiri ditunjukkan pada Gambar 5.

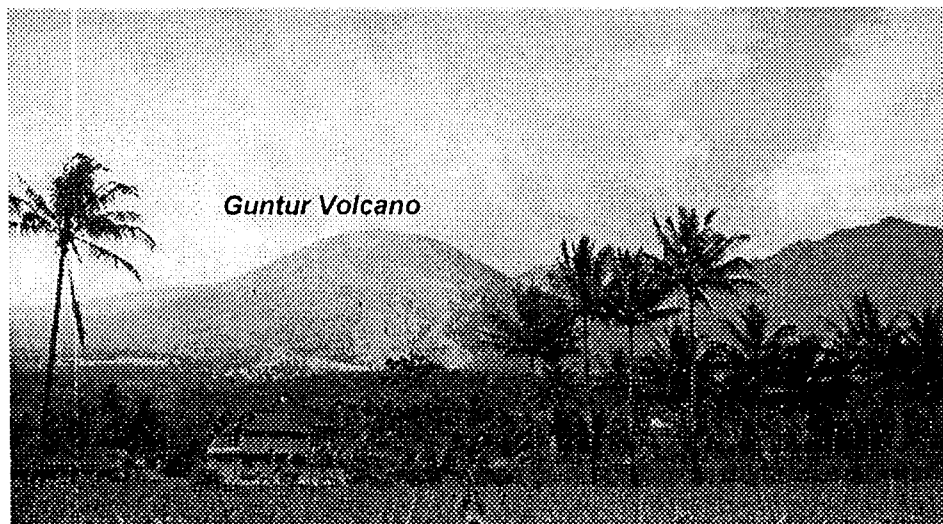
G. Guntur dipilih sebagai obyek penelitian karena termasuk gunung api aktif kelas-A, waktu 'istirahatnya' relatif sudah lama (sekitar 150 tahun), dan lokasinya yang relatif dekat dengan permukiman penduduk (kota Garut dan sekitarnya).

Gunung Guntur dibangun oleh hasil erupsi eksplosif maupun efusif yang berupa bom vulkanik, lapili, pasir, hingga abu, awan panas dan leleran lava. Gunung ini merupakan sebuah puncak aktif dari kompleks gunung Guntur – Gandapura yang terdiri atas beberapa kerucut erupsi tua. Pada zaman penjajahan Belanda, G. Guntur kerap meletus. Berdasarkan laporan, antara tahun 1800 sampai 1847 tercatat tidak kurang dari 21 letusan [Direktorat Vulkanologi, 1979], seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Letusan itu berulang-ulang dalam tempo pendek, berlangsung paling lama 5 sampai 12 hari. Ada kalanya terjadi berselang-selang antara 1, 2, dan 3 tahun dan ada kalanya letusan terjadi setelah masa berhenti 6 dan 7 tahun.

Letusan gunung Guntur pada umumnya dibarengi dengan semburan lava pijar, bom vulkanik, lapili dan efflata lainnya kemudian disusul dengan aliran lava pijar. Pada letusan 1840 terjadi aliran lava yang berbentuk sepatu 'boot' di atas Cipanas. Bahaya kedua atau bahaya sekunder dari letusan Gunung Guntur



Gambar 4 Lokasi Gunung Guntur (dari Katili and Sudradjat, 1984)



Gambar 5 Gunung Guntur, Garut, Jawa Barat

adalah lahar hujan dan bisa terjadi selama beberapa bulan atau beberapa tahun setelah letusan terakhir, bila endapan bahan lepasnya (piroklastik) belum padat. Lahar jenis ini terbentuk oleh air hujan lebat yang menggerakkan endapan bahan lepas di bagian atas lereng gunung.

Sejak 1847 hingga kini tidak dilaporkan kegiatan letusan lagi. Karena sudah cukup lama 'beristirahat', saat ini G. Guntur mendapatkan perhatian yang cukup besar dari Direktorat Vulkanologi, karena kalau terjadi

letusan, letusan tersebut dapat berupa letusan yang dahsyat. Mengingat banyaknya penduduk yang bermukim di sekitar G. Guntur maka pemantauan aktivitasnya harus dilakukan secara baik dan berkelanjutan. Menurut [Widaningsih, 1995], ada sekitar 274.657 penduduk yang hidup di daerah bahaya Gunung Guntur (yaitu Kecamatan Tarogong, Samarang, and Banyuresmi), dan sekitar 118.578 penduduk yang hidup di daerah waspada, yaitu di Kecamatan Leles and Kadungora.

Tabel 1 Kronologi aktivitas Gunung Guntur [Direktorat Vulkanologi, 1979].

Tahun	Keterangan
1690	Letusan besar, banyak orang menjadi korban, daerah rusak
1770 - 1780	Keterangan lanjut tidak ada
1777	Letusan
1780	Terjadi aliran lava
1803	Letusan pada 3 - 15 April
1807	9 Mei
1809	Keterangan lebih lanjut tidak
1815	15 Agustus
1815/1816	21 September
1816	21-24 Oktober
1825	14 Juni, hutan di sekitar gunung terbakar
1827/1828	Keterangan lebih lanjut tidak ditemukan
1829	Beberapa kampung hancur, jatuh beberapa korban
1832	16 Januari, 8-13 Agustus
1833	1 September
1834/1835/1836	Desember
1840	Terjadinya aliran lava ke Cipanas
1841	14 November. Letusan sangat besar. Sekitar 400.000 batang kopi hancur.
1843	4 Januari dan 25 November. Tanah rusak, beberapa kampung terlanta.
1847	Tidak ditemukan keterangan lebih lanjut.
1885	Tidak ada keterangan lebih lanjut.
1887	Tidak ada keterangan lebih lanjut.

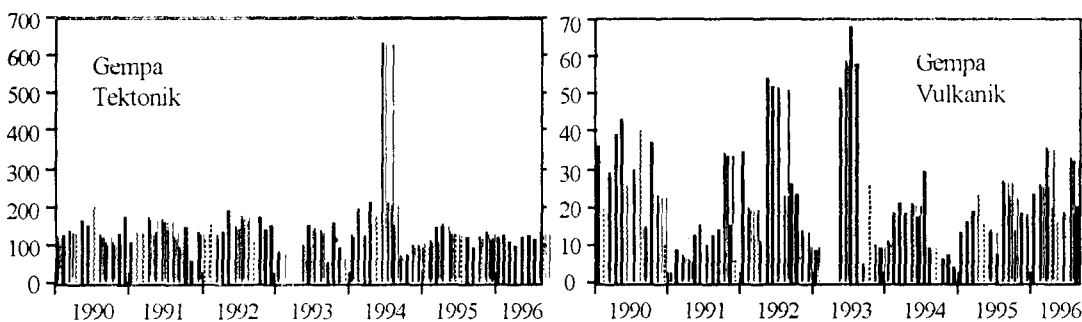
Patut juga dicatat di sini bahwa meskipun Gunung Guntur ini nampaknya sedang 'beristirahat', sebenarnya

dia tetap aktif. Ini ditunjukkan dengan tetap adanya gempa tektonik maupun vulkanik yang tercatat di kawasan gunung ini. Gambar 6 menunjukkan jumlah gempa tektonik dan vulkanik yang tercatat selama ini di Pos Pengamatan Gunung Guntur.

4 Studi kasus, hasil, dan pembahasan

Studi kasus pemantauan deformasi gunung api dengan metode survei GPS dilaksanakan di gunung Guntur, Garut, Jawa Barat. Studi penelitian ini merupakan kerjasama antara Jurusan Teknik Geodesi ITB dengan Direktorat Vulkanologi, Deptamben, dan dibiayai oleh dana penelitian Hibah Bersaing V dari Direktorat Pendidikan Tinggi, Depdikbud. Dalam hal ini, lokasi dan distribusi dari titik-titik jaringan pemantau deformasi G. Guntur dengan GPS ditunjukkan pada Gambar 7.

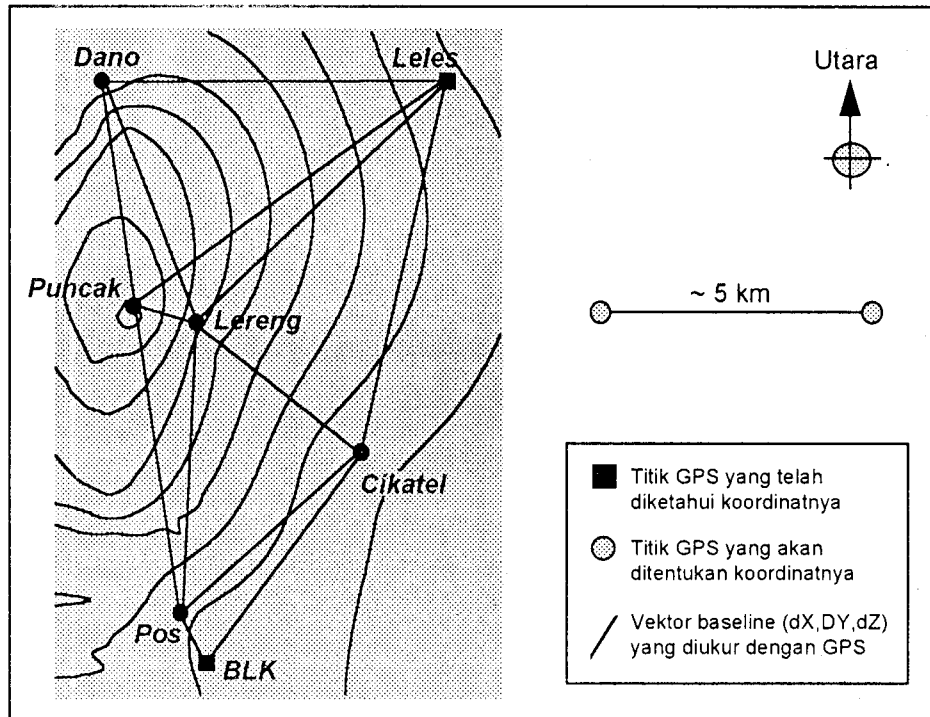
Titik-titik dalam jaringan mempunyai ketinggian yang cukup variatif, seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Dari gambar ini terlihat bahwa terdapat perbedaan ketinggian sebesar kira-kira 1200 m antara titik di puncak G. Guntur dengan titik-titik yang berada di kakinya. Perbedaan ketinggian yang relatif besar ini akan menyebabkan efek bias troposfer tidak bisa dieliminasi hanya dengan pengurangan data (*data differencing*) seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.



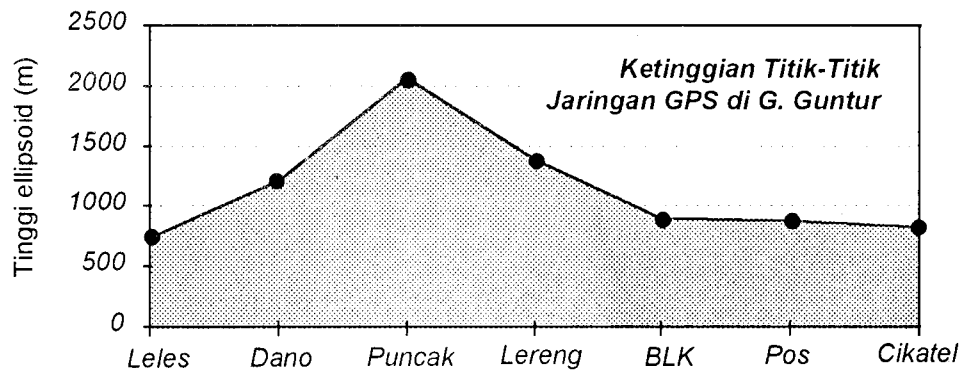
Gambar 6 Jumlah Gempa Tektonik dan Gempa Vulkanik G. Guntur.

Survei GPS untuk pemantauan deformasi G. Guntur telah dilaksanakan selama empat kali dengan selang waktu antarsurvei berkisar antara 3 sampai 4 bulan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Setiap kali survei umumnya memerlukan waktu pengamatan sekitar 4 hari. Pada pengamatan satelit GPS, besarnya *mask angle* yang digunakan adalah 15° , interval data pengamatan untuk perekaman adalah 30 detik, dan lama

pengamatan untuk setiap sesi adalah 4 sampai 5 jam. Dalam makalah ini hanya akan dibahas efek bias troposfer dengan menggunakan data dari tiga survei GPS yang pertama. Analisis deformasi yang diperoleh dari data keempat survei GPS tersebut dapat dilihat di [Abidin et al., 1997].



Gambar 7 Jaringan Pemantau GPS di G. Guntur.



Gambar 8 Variasi ketinggian titik-titik jaringan pemantau G. Guntur.

Tabel 2 Pelaksanaan Survei GPS di G. Guntur

Survei - GPS	Periode Pengamatan	Receiver GPS	Software
Survei - 1	23 - 28 Nov. 1996	4 Ashtech Z-XII3	Bernesse 4.0
Survei - 2	19 - 22 Feb. 1997	4 Ashtech Z-XII3	Bernesse 4.0
Survei - 3	02 - 05 Juni 1997	4 Ashtech Z-XII3	Bernesse 4.0
Survei - 4	30 Okt. - 1 Nov. 1997	3 Ashtech Z-XII3 + 2 Leica System 300	Bernesse 4.0

4.1 Studi terhadap efek bias troposfer

Dengan menggunakan data dari tiga survei GPS di G. Guntur di atas, akan dilihat efek bias troposfer terhadap nilai beda koordinat, nilai rms komponen koordinat, dan

panjang *baseline* yang diperoleh. Efek bias troposfer ini dipelajari dengan membandingkan hasil yang diperoleh dari hitung perataan jaring GPS *dengan* dan *tanpa* melakukan estimasi dan koreksi terhadap bias troposfer. Dalam hal ini digunakan perangkat lunak Bernesse 4.0

[Rothacher and Mervart, 1996] untuk mempelajari efek bias troposfer tersebut.

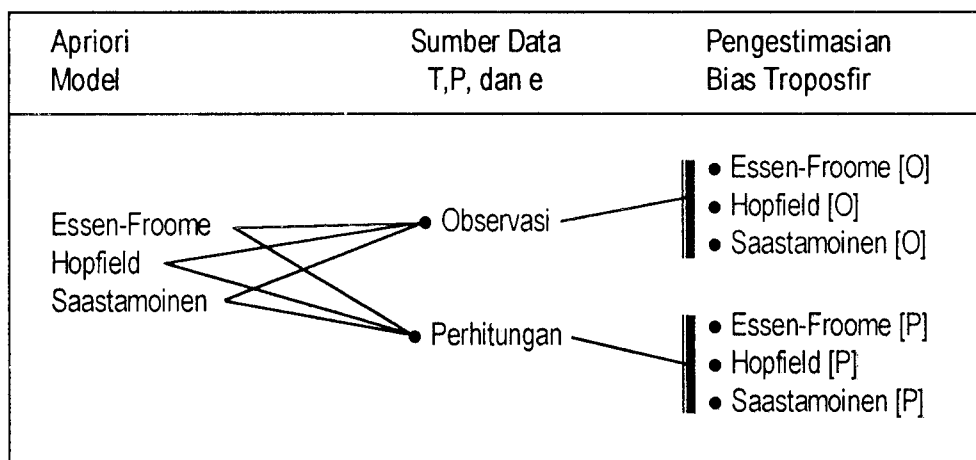
Dengan perangkat lunak Bernese 4.0 ini, efek bias troposfer dapat diestimasi besarnya atau diabaikan sama sekali (tidak diestimasi). Dalam kasus pengestimasiannya, ada beberapa pilihan yang dapat digunakan, yaitu:

- Model apriori yang digunakan untuk penentuan nilai awal bias troposfer: Essen-Froome, Hopfield, atau Saastamoinen. Penjelasan dan formulasi matematis ketiga model tersebut dapat dilihat di [Seeber, 1993].
- Data temperatur (T), tekanan (p), dan kelembaban udara (e) yang digunakan : data dari pengukuran lapangan atau data yang dihitung dari model atmosfer standar [Seeber, 1993].

- Penentuan koreksi terhadap model apriori: dilakukan atau tidak.

Dalam studi terhadap efek bias troposfer ini, penentuan koreksi terhadap model apriori selalu dilakukan, kecuali jika kasus bias troposfer tidak diestimasi. Konfigurasi pilihan yang dilakukan dalam penelitian efek bias troposfer ini diberikan pada Gambar 9.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, dalam penelitian efek bias troposfer ini digunakan data dari tiga survei GPS dari jaringan pemantau deformasi G. Guntur. Dalam hal ini data *baseline* yang digunakan dari masing-masing survei tersebut ditabulasikan pada Tabel 3, berikut keadaan cuaca pada saat pengamatan.



Gambar 9 Konfigurasi pilihan dalam pengestimasiannya bias troposfir yang dilakukan dalam penelitian ini.

Dalam penelitian ini, efek bias troposfer dilakukan dengan membandingkan hasil pengolahan data yang diperoleh tanpa mengestimasi bias troposfer dengan hasil yang diperoleh dengan mengestimasi bias troposfer. Pengolahan data di sini mencakup pengolahan *baseline* dan perataan jaringan.

Perlu ditekankan di sini bahwa dalam survei GPS, karena penentuan posisi titik dalam jaringan dilakukan secara relatif, maka efek bias troposfer yang paling berpengaruh adalah efek relatifnya, yaitu perbedaan nilai bias troposfer antara sesama titik dalam jaringan GPS. Dan besarnya efek relatif ini akan sangat tergantung pada perbedaan kondisi meteorologis serta perbedaan ketinggian antara sesama titik.

4.2 Efek pada koordinat titik

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bias troposfer akan memperpanjang jarak ukuran ke satelit GPS. Akibatnya, koordinat titik pengamat pun akan dipengaruhi oleh bias troposfer ini. Mengingat efek bias

relatif troposfer yang tidak sama untuk setiap *baseline* dalam jaringan, maka dapat diperkirakan bahwa tidak hanya komponen vertikal yang dipengaruhi; tapi komponen horizontal dari koordinat akan dipengaruhi.

Tabel 4 menunjukkan efek pengabaian bias relatif troposfer pada komponen vertikal dari koordinat. Hasil ini diturunkan dengan menggunakan Leles sebagai titik acuan (referensi). Dari tabel ini terlihat bahwa efek bias relatif troposfer pada komponen vertikal koordinat dapat mencapai level beberapa mm untuk survei-1 dan survei-3, dan bahkan beberapa cm untuk survei-2. Seperti yang diperkirakan, bias relatif troposfer mempunyai efek terbesar untuk titik Puncak yang ketinggiannya relatif lebih tinggi dibandingkan dengan titik-titik lainnya. Di samping itu, untuk survei-2 yang dilaksanakan pada saat kondisi cuaca yang relatif lebih buruk dibandingkan dengan kondisi cuaca dari survei-1 dan survei-3 (lihat Tabel 3), efek bias troposfer ini juga terlihat lebih besar dibandingkan dengan efeknya pada survei-1 dan survei-3.

Dari hasil yang diberikan pada Tabel 4 juga menarik untuk dicatat bahwa untuk model troposfir apriori yang berbeda dan juga untuk cara mendapatkan data temperatur, tekanan, dan kelembaban yang berbeda (pengamatan ataupun perhitungan), hasil yang diberikan selalu sama, selama koreksi terhadap hasil perhitungan dari model apriori juga diestimasi dalam proses pengolahan data. Dengan kata lain, dengan menggunakan perangkat lunak Bernese 4.0 yang dapat mengestimasi parameter troposfer, maka untuk kasus jaringan GPS di G. Guntur ini jenis model troposfer apriori yang akan digunakan maupun perlu tidaknya pengukuran data meteorologi di lapangan, bukanlah isu yang krusial.

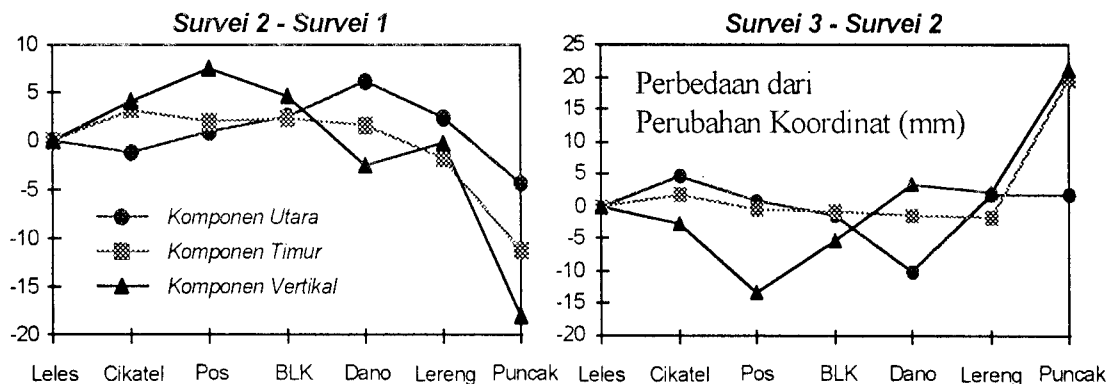
Efek bias troposfer juga mempengaruhi komponen horizontal dari koordinat, baik dalam arah utara (dU) maupun arah timur (dT), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Pada tabel ini, mengingat hasil yang diberikan oleh setiap model relatif sama, seperti halnya dalam kasus komponen vertikal (dV), maka hanya digunakan nilai dari satu model, yaitu Saastamoinen (P), sebagai pembanding untuk menunjukkan efek bias relatif troposfer pada komponen horizontal koordinat titik. Menarik juga untuk dicatat dari Tabel 4 ini bahwa untuk beberapa titik dalam jaringan, efek bias relatif troposfer pada komponen horizontal dapat lebih besar dibandingkan dengan efeknya pada komponen vertikal. Dari Tabel ini juga terlihat bahwa besarnya efek bias

relatif troposfer terhadap koordinat titik, di samping mempunyai variasi spasial dari titik ke titik, juga mempunyai variasi temporal dari survei ke survei.

4.3 Efek pada pergeseran titik

Pada pemantauan deformasi gunung api dengan metode survei GPS yang dilakukan secara berulang, perubahan koordinat titik-titik dari suatu survei ke survei selanjutnya adalah informasi yang sangat penting untuk mempelajari karakteristik deformasi gunung api tersebut. Untuk mendapatkan karakteristik deformasi yang benar dan andal, maka informasi tentang perubahan koordinat yang benar dan andal pun haruslah digunakan. Dalam hal ini pengabaian efek bias relatif troposfer dapat mengakibatkan informasi perubahan koordinat yang diperoleh menjadi tidak benar, dan akibatnya karakteristik deformasi yang selanjutnya diturunkan pun menjadi tidak benar pula.

Gambar 10 menunjukkan besarnya efek bias relatif troposfer terhadap nilai perubahan komponen koordinat dari survei ke survei. Grafik pada Gambar 10 diturunkan berdasarkan data yang diberikan pada Tabel 5. Dari gambar ini terlihat bahwa pengabaian efek bias relatif troposfer mengakibatkan terjadinya kesalahan pada informasi perubahan koordinat, yang besarnya secara umum pada level beberapa mm dan bahkan untuk stasiun Puncak mencapai level 1-2 cm.



Gambar 10 Perbedaan nilai perubahan koordinat antara dua survei (dalam mm) antara nilai tanpa estimasi troposfer dengan nilai dengan estimasi : Saatamoinen (P).

4.4 Efek pada nilai RMS

Efek bias relatif troposfer tidak hanya mempengaruhi ketelitian komponen koordinat, tapi juga tingkat presisi komponen koordinat itu sendiri. Ini ditunjukkan pada Tabel 6, yaitu untuk komponen vertikal, di mana tingkat presisi ditandai dengan variabel rms (*root mean squares*). Dari tabel ini terlihat bahwa dengan mengestimasi bias troposfer, nilai rms dari komponen vertikal koordinat dapat ditekan dari level beberapa mm

(dan bahkan dalam kasus tertentu dari level beberapa cm) ke level lebih baik dari satu mm.

Dari Gambar 11 juga terlihat bahwa efek bias relatif troposfer terhadap nilai rms dari komponen vertikal koordinat mempunyai variasi spasial dan variasi temporal yang berkisar antara beberapa mm sampai beberapa cm

Tabel 3 *Baseline* yang digunakan

SURVEI GPS - 1				
<i>Tanggal Pengamatan</i>	<i>Sesi</i>	<i>Baseline</i>	<i>Waktu (WIB)</i>	<i>Keadaan cuaca di kedua titik ujung baseline</i>
23 Nov 1996	A	Dano-Leles Pos-Leles	14.40-18.15	hujan-hujan hujan-hujan
24 Nov 1996	A	Cikatel-Leles BLK-Cikatel	10.00-16.00	hujan-hujan hujan-hujan
25 Nov 1996	A	BLK-Cikatel	10.00-16.00	gerimis-gerimis
26 Nov 1996	A	BLK-Pos Cikatel-Pos	10.00-15.30	cerah-cerah cerah-cerah
27 Nov 1996	A	Pos-Lereng Dano-Lereng Dano-Puncak	11.30-16.30	cerah-cerah cerah-cerah cerah-cerah
28 Nov 1996	A	Lereng-Puncak Pos-Puncak	07.00-13.00	cerah-cerah cerah-cerah
SURVEI GPS - 2				
<i>Tanggal Pengamatan</i>	<i>Sesi</i>	<i>Baseline</i>	<i>Waktu (WIB)</i>	<i>Keadaan cuaca di kedua titik ujung baseline</i>
19 Feb. 1997	A	BLK-Cikatel BLK-Pos Cikatel-Leles	07.00-11.30	mendung-mendung mendung-mendung mendung-mendung
	B	Dano-Cikatel Leles-Dano	12.30-17.30	mendung-mendung mendung-mendung
20 Feb. 1997	A	Pos-Cikatel Cikatel-Lereng Cikatel-Puncak	07.30-12.00	mendung-mendung mendung-mendung (berkabut) mendung-hujan(badai)
21 Feb. 1997	B	Pos-Puncak Puncak-Lereng	09.30-17.00	mendung-hujan(badai) hujan(badai)-berkabut
	B1	BLK-Puncak	13.00-16.30	mendung-hujan(badai)
	C	Pos-Lereng Lereng-Leles	17.00-21.30	mendung-hujan(badai) berkabut-mendung
22 Feb. 1997	A	Dano-Leles Dano-Lereng Dano-Puncak	07.00-13.30	mendung-mendung mendung-gerimis(berkabut) mendung-hujan(badai)
SURVEI GPS - 3				
<i>Tanggal Pengamatan</i>	<i>Sesi</i>	<i>Baseline</i>	<i>Waktu (WIB)</i>	<i>Keadaan cuaca di kedua titik ujung baseline</i>
2 Juni 1997	A	•BLK-Cikatel	07.30-11.30	cerah-cerah
	B	Cikatel-Leles Dano-Cikatel	13.30-16.00	cerah-cerah cerah-cerah
3 Juni 1997	A	Lereng-Pos Pos Puncak	09.00-13.00	cerah-cerah cerah-cerah
	B	Cikatel-Lereng Cikatel-Pos	13.00-17.00	cerah-cerah cerah-cerah
4 Juni 1997	A	BLK-Pos Lereng-BLK	7.30-10.00	cerah-cerah cerah-cerah
	B	Lereng-Puncak	14.00-16.30	cerah-cerah
	C	Leles-Lereng Leles-Pos	18.30-21.00	cerah-cerah cerah-cerah
5 Juni 1997	A	Dano-Leles	07.30-11.30	cerah-cerah
	B	Dano-Puncak Dano-Lereng	11.30-15.00	cerah-cerah cerah-cerah

Tabel 4 Perbedaan nilai komponen vertikal koordinat toposentrik (dalam mm) antara nilai tanpa estimasi troposfer dengan nilai dengan estimasi.

Perbedaan komponen vertikal (dalam mm)							
Survei - 1	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Essen-Froome (P)	0	0.1	5.2	-0.4	0.4	0.1	-5.4
Hopfield (P)	0	0.1	5.2	-0.4	0.4	0.1	-5.4
Saastamoinen (P)	0	0.1	5.2	-0.4	0.4	0.1	-5.4
Survei - 2	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Essen-Froome (P)	0	4.2	12.7	4.2	-2.1	-0.1	-23.4
Hopfield (P)	0	4.2	12.7	4.2	-2.1	-0.1	-23.4
Saastamoinen (P)	0	4.2	12.7	4.2	-2.1	-0.1	-23.4
Essen-Froome (O)	0	4.1	12.7	4.2	-2.1	-0.1	-23.4
Hopfield (O)	0	4.2	12.8	4.4	-2.1	0.0	-23.7
Saastamoinen (O)	0	4.2	12.8	4.2	-2.1	-0.2	-23.4
Survei - 3	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Essen-Froome (P)	0	1.4	-0.8	-0.9	1.3	2.0	-2.4
Hopfield (P)	0	1.4	-0.7	-0.9	1.3	2.0	-2.4
Saastamoinen (P)	0	1.4	-0.7	-0.9	1.3	2.0	-2.4
Essen-Froome (O)	0	1.4	-0.7	-0.9	1.3	2.1	-2.4
Hopfield (O)	0	1.4	-0.7	-0.8	1.3	1.9	-2.4
Saastamoinen (O)	0	1.4	-0.7	-0.8	1.3	2.0	-2.4

Tabel 5 Perbedaan nilai komponen koordinat dari koordinat toposentrik (dalam mm) antara nilai tanpa estimasi troposfir dengan nilai dengan estimasi : Saastamoinen (P).

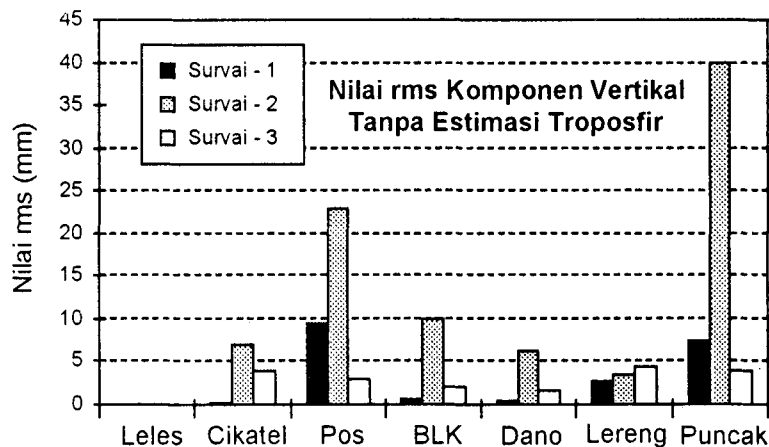
Perbedaan komponen koordinat (dalam mm)							
Survei - 1	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
dU (mm)	0	-0.3	-2.8	-2.7	-4.3	-0.4	2.7
dT (mm)	0	-0.5	1.6	2.4	-3.6	-0.3	-0.9
dV (mm)	0	0.1	5.2	-0.4	0.4	0.1	-5.4
Survei - 2	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
dU (mm)	0	-1.5	-1.9	-0.2	1.9	2.0	-1.6
dT (mm)	0	2.7	3.6	4.7	-2.0	-2.1	-12.1
dV (mm)	0	4.2	12.7	4.2	-2.1	-0.1	-23.4
Survei - 3	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
dU (mm)	0	3.2	-1.1	-1.6	-8.2	4.0	0.2
dT (mm)	0	4.7	3.3	3.9	-3.3	-3.9	7.4
dV (mm)	0	1.4	-0.7	-0.9	1.3	2.0	-2.4

Tabel 6 Perbandingan nilai rms komponen vertikal koordinat toposentrik (dalam mm), antara solusi tanpa estimasi troposfer dan solusi dengan estimasi troposfer.

Nilai rms komponen vertikal (dalam mm)							
Survei - 1	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Tanpa Estimasi	0	0.3	9.4	0.7	0.5	2.7	7.4
Essen-Froome (E)	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
Hopfield (E)	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
Saastamoinen (E)	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
Survei - 2	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Tanpa Estimasi	0	6.9	23.0	10.0	6.3	3.5	39.8
Essen-Froome (E)	0	0.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.5
Hopfield (E)	0	0.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.5
Saastamoinen (E)	0	0.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.5
Essen-Froome (O)	0	0.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.5
Hopfield (O)	0	0.4	0.2	0.5	0.4	0.3	1.0
Saastamoinen (O)	0	0.4	0.3	0.2	0.4	0.5	0.5
Survei - 3	Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Tanpa Estimasi	0	3.9	3.1	2.2	1.6	4.3	3.9
Essen-Froome (E)	0	1.0	0.2	0.2	0.7	0.2	0.1
Hopfield (E)	0	1.0	0.2	0.2	0.7	0.2	0.1
Saastamoinen (E)	0	1.0	0.2	0.2	0.7	0.2	0.1
Essen-Froome (O)	0	1.0	0.2	0.2	0.7	0.2	0.1
Hopfield (O)	0	0.9	0.3	0.2	0.7	0.2	0.1
Saastamoinen (O)	0	0.9	0.3	0.2	0.7	0.2	0.1

Berkaitan dengan komponen horisontal, pengestimasi bias troposfer juga secara umum akan memperbaiki nilai rms dari komponen horisontal yang diperoleh. Ini ditunjukkan dengan hasil yang diberikan pada Tabel 7, yang merupakan selisih antara nilai rms tanpa koreksi troposfer dan nilai rms yang diperoleh dari pengolahan data dengan pengestimasi bias troposfer menggunakan model Saastamoinen (P). Perlu dicatat pada tabel ini bahwa dalam beberapa kasus,

pengestimasi bias troposfer malah memperburuk nilai rms dari komponen horisontal. Mengingat ini tidak terjadi sama sekali dalam kasus komponen vertikalnya, maka penyebab anomali tersebut kemungkinan bukan terkait dengan pengestimasi bias troposfer, tapi pada sumber kesalahan lainnya yang bersifat lokal, misalnya *multipath*.



Gambar 11 Nilai rms komponen vertikal dari koordinat (tanpa estimasi troposfir).

Tabel 7 Selisih nilai rms komponen horisontal, antara solusi tanpa estimasi troposfer dan solusi dengan estimasi troposfer menggunakan model Saastamoinen (P)

		Selisih nilai rms (dalam mm)						
Survei - 1		Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Komponen Utara		0	0.1	5.2	5.3	6.1	3.6	3.8
Komponen Timur		0	-1.3	2.5	4.8	5.7	1.3	0.9
Survei - 2		Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Komponen Utara		0	-1.9	2.6	1.4	4.7	-1.2	3.6
Komponen Timur		0	4.0	5.7	8.6	1.2	-2.2	19.1
Survei - 3		Leles	Cikatel	Pos	BLK	Dano	Lereng	Puncak
Komponen Utara		0	3.5	1.3	-2.2	2.8	-1.2	0.4
Komponen Timur		0	-6.9	0.1	-7.4	3.9	7.7	8.8

4.5 Efek pada panjang baseline

Karena efek bias relatif troposfer mempengaruhi komponen koordinat, baik dalam arah horisontal maupun vertikal, maka panjang *baseline* antartitik pun akan dipengaruhi. Tabel 8 memberikan contoh efek pengabaian bias relatif troposfer terhadap panjang *baseline* dari titik Pos ke titik Puncak yang mempunyai perbedaan tinggi sekitar 1300 meter. Di sini terlihat bahwa tanpa koreksi troposfer, panjang *baseline* dapat berubah sampai sekitar 1 cm dibandingkan dengan kalau koreksi troposfer diaplikasikan.

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa seandainya analisis deformasi dilakukan berdasarkan perubahan panjang *baseline* dalam jaringan, maka hasil analisis

deformasi yang diperoleh akan menjadi tidak benar, seandainya bias relatif troposfer tidak diestimasi dalam pengolahan data.

5 Kesimpulan dan saran

Dari studi terhadap efek bias troposfer dalam pemantauan deformasi G. Guntur dengan metode survei GPS, ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil serta saran yang dapat diberikan, yang dijabarkan dalam butir-butir berikut ini.

Tabel 8 Variasi panjang baseline (dL) antara Leles dan Puncak (L = Panjang Baseline dalam mm)

Leles - Puncak (dh = 1336.4 m)	Variasi Panjang Baseline, dL (mm)		
	Survei - 1 L = 7416729 + dL	Survei - 2 L = 7416732 + dL	Survei - 3 L = 7416727 + dL
Essen-Froome (E)	- 0.3	- 0.1	+ 0.5
Hopfield (E)	- 0.3	- 0.1	+ 0.5
Saastamoinen (E)	- 0.3	- 0.1	+ 0.5
Tanpa Estimasi	- 4.4	+ 11.4	- 11.6
Essen-Froome (O)	-	- 0.1	+ 0.4
Hopfield (O)	-	+ 2.9	+ 0.5
Saastamoinen (O)	-	- 0.1	+ 0.5

- 1 Dalam jaring GPS untuk pemantauan deformasi gunung api yang titik-titiknya mempunyai variasi ketinggian yang relatif besar (dalam orde ratusan sampai seribuan meter), efek bias relatif troposfer mempengaruhi komponen koordinat dan ketelitiannya, serta panjang *baseline* dalam jaringan. Secara umum, untuk survei yang dilaksanakan pada kondisi cuaca yang relatif baik, besarnya efek ini berkisar pada level beberapa mm, sedangkan untuk survei yang dilaksanakan pada kondisi yang relatif buruk, besarnya efek ini bahkan dapat mencapai beberapa cm.
- 2 Untuk pemantauan deformasi gunung api dengan metode survei GPS yang menuntut ketelitian tinggi, yaitu pada level beberapa mm sampai 1-2 cm, dan titik-titik dalam jaringan pemantau mempunyai variasi ketinggian yang relatif besar, maka bias relatif troposfer harus diestimasi.
- 3 Karena perangkat lunak pengolah data survei GPS yang bersifat komersial (seperti GEOLAB, GPSurvey, dan GPPS) tidak dapat mengestimasi parameter koreksi terhadap model apriori troposfer yang digunakan, maka untuk pemantauan deformasi gunung api yang menuntut ketelitian tinggi seperti di atas, pengolahan datanya harus dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ilmiah seperti Bernesse, GAMIT, dan GIPSY.
- 4 Seandainya perangkat lunak ilmiah digunakan, dan koreksi terhadap model apriori troposfer yang digunakan dapat diestimasi, maka dalam pengestimasian bias troposfer, model apriori troposfer apa pun dapat digunakan. Di samping itu, tampaknya temperatur, tekanan, dan kelembaban tidak perlu diukur di lapangan, dan cukup dihitung dengan menggunakan model standar troposfer. Meskipun hal ini valid untuk kasus G. Guntur, hipotesis ini sebaiknya diverifikasi dengan kasus pemantauan di gunung api lainnya dengan kondisi cuaca yang berbeda-beda.

Daftar pustaka

1. Abidin, H.Z. (1995). *Penentuan Posisi Dengan GPS dan Aplikasinya*. P.T. Pradnya Paramita, Jakarta. ISBN 979-408-377-1. 100 hal.
2. Abidin, H.Z., O.K. Suganda, M.A. Kusuma, I. Meilano, B. Setyadji, D. Muhardi, R. Sukhyar, J. Kahar, T. Tanaka (1997). "Monitoring the Deformation of Guntur Volcano (West Java, Indonesia) Using GPS Survey Method: Status and Future Plan." *Proceedings of International Symposium on Natural Disaster Prediction and Mitigation*, Kyoto, December 1-5, pp. 81 - 88.
3. Banks, N.G., R.I. Tilling, D.H. Harlow, and J.W. Ewert (1989). "Volcano monitoring and short term forecast." In *Volcanic Hazards* (ed. R.I. Tilling). American Geophysical Union, Washington, D.C., USA.
4. Direktorat Vulkanologi (1979). *Data Dasar Gunung Api Indonesia. Catalogue of References on Indonesian Volcanoes with Eruptions in Historical Time*. Direktorat Jenderal Pertambangan Umum. Departemen Pertambangan dan Energi. 820 halaman.
5. Kahar, J., T. Tanaka, I. Murata, S. Suparka, F. Kimata, S. Okubo, K. Nakamura, K. Prijatna, P. Mentosumitro, B. Setyadji, S. Miura, K. Villanueva, Kamtono, A. Suwandito, and Sudarman (1993). "GPS Campaign for Crustal Deformation Monitoring in West Java, Indonesia (1992-1993)." *Proceedings of The Eight International Symposium on Recent Crustal Movement Symposium*, Kobe, December 6 - 11, pp. 43 - 46.
6. Katili, J.A. and A. Sudradjat (1984). *Galunggung: The 1982-1983 Eruption*. Volcanological Survey of Indonesia, Bandung, 102 pp.
7. Katili, J.A. and S.S. Siswawidjojo (1994). *Pemantauan Gunung api di Filipina dan Indonesia*. Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI). ISBN: 979-8126-05-6. 321 h + xii.

8. Leick, A. (1995). GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons. Second edition. New York. ISBN 0-471-30626-6. 560 pp.
9. McGuire B., C.R.J. Kilburn, and J. Murray (Eds) (1995) *Monitoring Active Volcanoes*. UCL Press Limited. London. 421 pp.
10. Rothacher, M. and L. Mervart (Eds.) (1996). *Bernese GPS Software version 4.0*. Astronomical Institute. University of Berne. September. 418 pp.
11. Scarpa, R. and R.I. Tilling (Eds.) (1996). *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer Verlag. Berlin. 841 pp.
12. Seeber, G. (1993). *Satellite Geodesy : Foundations, Methods, and Applications*. Walter de Gruyter, Berlin. ISBN 3-11-012753-9, 531 pp.
13. Suantika, G., O. K. Suganda, M. Iguchi, K. Ishihara (1997). "Hypocentral distribution and focal mechanism of volcanic earthquakes around Guntur volcano, West Java, Indonesia." *Proceedings of the 22nd Scientific Annual Meeting of Association of Indonesian Geophysicists*. Bandung. 16 - 17 October. pp. 209 - 212.
14. Widaningsih, N. (1995). "Laporan Kegiatan Pengamatan Bahan Informasi G. Guntur." *Laporan Kegiatan Proyek Pengamatan/Pengawasan dan Pemetaan Gunungapi*, Tahun Anggaran 1994/1995, Direktorat Vulkanologi, April.